

航改大功率、高效率舰船燃气轮机的 技术发展途径探讨

杨立山¹, 郑培英², 聂海刚², 朱 敏²

(1. 海军驻沈阳地区发动机专业军事代表室, 沈阳 110043; 2. 中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



杨立山(1969), 男, 高级工程师, 从事航空发动机和舰船燃气轮机控制系统研究与管理工作。

基金项目: 燃气轮机工程研究项目资助 110043, China; 2. AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

收稿日期: 2013-11-03

摘要: 为适应舰船战术性能和舰船吨位级别提高的要求, 迫切需要研究大功率、高效率舰船燃气轮机。通过对国内外战舰主动力装置进行分析, 认为中国开发 40000 kW 的大功率燃气轮机是十分必要的, 利用现有航空发动机的技术资源优势, 采用先进的间冷技术是发展大功率、高效率舰船燃气轮机的 1 条现实可行的技术途径, 既可以提高燃气轮机在设计工况下的功率和热效率, 又能保持在低工况下的高效率。

关键词: 航改燃气轮机; 舰船燃气轮机; 间冷循环; 技术途径

Technology Development Approach Discuss of High Power and High Efficiency Marine Gas Turbine Derived from Aeroengine

YANG Li-shan¹, ZHENG Pei-ying², NIE Hai-gang², ZHU Min²

(1. Engine Affairs Military Representatives Office Navy in Shenyang Area, Shenyang

110043, China; 2. AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to adapt the heightening of the marine tactics and the tonnage, the high power and high efficiency gas turbine needs to be researched urgently. It is very necessary to develop 40000 kW high power gas turbine by analysizing the marine power plant at home and abroad. By using the technology resource advantage of aeroengine, the advanced intercool technology is a useful approach to develop the high power and high efficiency gas turbine. It can not only improve high power and the efficiency on the design point, but also keep the high efficiency of the low working condition

Key words: aero-derivative gas turbine; marine gas turbine; intercool cycle; technology approach

0 引言

燃气轮机是继蒸汽轮机和内燃机之后的新一代动力装置, 具有质量轻、尺寸小、功率大、起动快、污染小、可靠性高、寿命长等诸多优点。经过半个多世纪的发展, 燃气轮机技术日臻完善^[1]。目前, 舰船动力装置使用方式已从早期的蒸汽轮机与燃气轮机共同使用装置(COSAG)发展到目前的柴油机与燃气轮机交替使用装置(CODOG)、燃气轮机与燃气轮机交替使用装置(COGOG)、燃气轮机与燃气轮机共同使用装置(COGAG)。过进行过燃—蒸联合和燃气轮机共同使用装置(COGASAG), 以及柴油机电力推进和燃气轮机共同使用装置(CODLAG)^[2]研究。

各国舰船燃气轮机采用的方式不同, 美国以 LM2500 燃气轮机为基本型, 采用 COGAG 方式; 英国目前舰船用动力装置多采用 COGOG 方式, 如以 2 台 Olympus TM3B (或 Spey SM1C) 用作加速机组, 以 Tyne RM1C 用作巡航机组; 德国、法国、日本等国由于本国柴油机基础雄厚, 多采用 CODOG 形式。中国海军目前的水面舰船动力装置仍然以蒸汽轮机和柴油机为主, 只有很少数量的舰船上采用了燃气轮机。今后需要相当数量的反潜护卫舰、护卫舰及各种用途的驱逐舰组成中国海军的主要水面舰队。对于这些要求续航力大、火力和武器装备较强、机动性能较好的现代化水面舰船的动力装置而言, 燃气轮机将是重点发展方向之一。

本文进行了航改大功率、高效率舰船燃气轮机的技术研究,探讨发展航改大功率、高效率舰船燃气轮机的技术途径。

1 大功率、高效率燃气轮机军事需求分析

对国内外舰船燃气轮机发展趋势的研究表明,舰船燃气轮机走航机改型的发展道路已经取得了共识,航改燃气轮机在大、中型水面舰船动力装置中已处于主导地

位,成为世界各国海军装备现代化的重要标志之一。

随着对舰船战术性能和舰船吨位级别要求的提高,舰船燃气轮机越来越朝着大功率、高效率、低排放的方向发展,如 MT30、WR-21、LM2500+、LM2500+G4 等,这些应用广泛的舰船燃气轮机均是航改型,特别是随着舰船全电力推进系统的发展,对燃气轮机的功率等级提出了更高要求。典型的燃气轮机应用战舰情况^[3-4]见表 1。

表 1 典型的燃气轮机战舰

	国家	舰级	满载/t	航速 /kn	形式	公司	型号	台数	功率 /kW
航空母舰	英国	“无敌”级轻型航空母舰(CVSG)	20600	28	COGAG	RR	“奥林普斯”TM3B	4	71490
	意大利	“约瑟夫·加里博迪”级轻型航空母舰	13850	30	COGAG	菲亚特 /GE	LM2500	4	59575
	西班牙	“阿斯图里亚斯亲王”号轻型航空母舰	17188	25(+4.5)		GE	LM2500	2	34127
	泰国	“查克理王朝”级直升机母舰	11485	26	CODOG	GE	LM2500	2	32546
驱逐舰	美国	“提康德罗加”级导弹巡洋舰(CG-AEGIS)	9590	≥30	COGAG	GE	LM2500	4	63253
	俄罗斯	“光通”(“阿特兰特”)级导弹巡洋舰	11200	32	COGAG	不明	不明	4+2	64724+14710
	美国	“喀拉”(“贝尔科特”)级导弹巡洋舰	9900	32	COGAG	不明	不明	4+2	80022+10003
	美国	“阿利·伯克”级导弹驱逐舰(Ⅰ和Ⅱ型)	8422/9033	32		GE	LM2500	4	77227
巡洋舰	美国	“阿利·伯克”级导弹驱逐舰(FLIGHTⅡA型)	9217	32		GE	LM2500	4	77227
	美国	“斯普鲁恩斯”级导弹驱逐舰(FLIGHTⅡA型)	8040	33		GE	LM2500	4	63253
	英国	42 型导弹驱逐舰	4675	≥30	COGOG	RR	“奥林普斯”TM3B	2	36775
	法国	“乔治·莱格”级(F70 型)	4580	30	CODOG	RR	“奥林普斯”TM3B	2	33980
	日本	“金刚”级	9485	30	COGAG	GE	LM2500	4	75139
	日本	“朝雾”级	4200	≥30	COGAG	RR	“斯贝”SM1A	4	39202
	日本	“初雪”级	3800	30	COGOG	川崎 /RR	“奥林普斯”TM3B	2	36334
	印度	“德里”级	6700	28	CODAG	俄罗斯	AM50	2	39717
	韩国	“玉浦”级	3900	30	CODOG	GE	LM2500	2	42806
	阿根廷	“布朗海军上将”级	3360	30.5	COGOG	RR	“奥林普斯”TM3B	2	36775
	阿根廷	“大力士”级	4100	29	COGOG	RR	“奥林普斯”TM3B	2	36775
	美国	“奥利弗·哈泽德·佩里”级导弹护卫舰	4100	29		GE	LM2500	2	30155
护卫舰	俄罗斯	“不惧”(“隼”)级(1154 型)	4250	30	COGAG	不明	不明	2	
	英国	“大刀”(22 型)	4900	30	COGOG	RR	“斯贝”SM1A	2	
	德国	“不莱梅”级(122 型) / “勃兰登堡”级(123 型)	3600/4700	30/29	CODOG	GE	LM2500	2	37510
	意大利	“西北风”级 / “狼”级	3200	32	CODOG	菲亚特 /GE	LM2500	2	36775
	意大利	“卡雷尔·多尔曼”级	3320	30	CODOG	RR	“斯贝”SM1C	2	24860
	澳大利亚	“安扎克”级(MEKO 200)	3600	27	CODOG	GE	LM2500	1	22191
	澳大利亚	“阿德莱德”级	4100	29		GE	LM2500	2	30155
	西班牙	F100 级	5802	28	CODOG	GE	LM2500	2	34810
	巴西	“伊尼亚乌马”级 / “巴罗索”级	1970/2350	27	CODOG	GE	LM2500	1	20226
	以色列	“埃拉特”(SAAR 5)级	1227	33	CODOG	GE	LM2500	1	22065
	日本	“阿武隈”级	2550	27	CODOG	RR	“斯贝”SM1A	2	19601
	印度	改进型“克里瓦克”Ⅲ级	3650	32	COGAG		AM50	2	39717
	印度	“维尔”级轻型导弹护卫舰	455	36	CODOG	GE	LM2500	1	17137
	韩国	“蔚山”级	2300	34	CODOG	GE	LM2500	2	39452
	韩国	“浦项”级 / 东海级轻型导弹护卫舰	1220	32	CODOG	GE	LM2500	1	19726

通过分析国内外战舰主动力装置,认为中国开发 40000 kW 级的大功率燃气轮机是十分必要的。护卫舰装用 1 台,驱逐舰装用 1~2 台,巡洋舰和轻型航母可装用 2 台,从而可使该型燃气轮机既可装用于护卫舰和驱逐舰又能装用于巡洋舰和航空母舰。

尽管舰船燃气轮机研制起步较晚,但由于航空技术发展很快,至今舰船燃气轮机已发展了 3 代。目前,主要海军国家的舰船燃气轮机系列均已发展得非常完善,效率已超过了 40%,单机功率超过了 40000 kW。所以开展 40000 kW 大功率燃气轮机的研制工作可以完善中国海军舰船燃机动力型谱,配套先行,与世界先进国家海军建设同步。

大功率、高效率舰船燃气轮机的主要性能指标见表 2。

表 2 大功率、高效率舰船燃气轮机的主要性能指标

性能指标	标准工作条件	海军工作条件
进气温度 / $^{\circ}\text{C}$	15	27
进气损失 /Pa	0	4314.9
排气损失 /Pa	0	5491.7
功率 /kW	≥ 40000	≥ 38000
热效率 /%	42 ~ 44	≥ 40

2 航改大功率、高效率舰船燃气轮机研制的技术途径

2.1 开发简单循环航改舰船燃气轮机

GE、RR 和 PW 3 大航空发动机公司均开展了“联合先进燃气轮机计划”,对航空涡扇发动机进行大功率燃气轮机工业和船用改装。PW 公司将 PW4000 发动机改型为 FT4000 燃气轮机,单台功率为 47 MW,效率为 42%;RR 公司将 Trent 800 发动机改型为 MT30 燃气轮机,功率为 36 MW,热效率为 40%。截至 2007 年初,已经交付 MT30 燃气轮机 32 台份(工业发电、机械驱动和船用)。在船用方面,美国海军 DDG-1000 Zumwalt 级驱逐舰和西班牙高速货船使用了 MT30 燃气轮机;GE 公司在 CF6-80C2 航空发动机的基础上派生的大功率燃气轮机 LM6000,其基本负荷为 43000 ~ 50000 kW,热效率可达 42% 以上。截至 2007 年初,LM6000 燃气轮机(如图 1 所示)共生产了 770 台份,在海军和民用大船方面均有用户。

中国航空工业集团公司研制了不同用途的多种航空发动机,具备了一定的核心机技术储备。因此,充

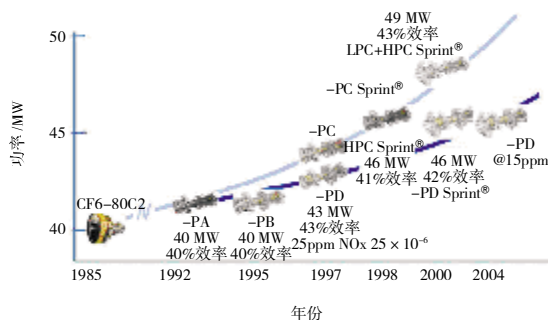


图 1 LM6000 大功率、高效率燃气轮机系列发展

分利用这些技术储备,相对快速、经济地发展新型发动机成为 1 条有效的技术途径。

通过提高燃气轮机的压比和流量可以提高燃气轮机的功率和热效率。LM6000 燃气轮机的压气机的全压比已经增加了近 20 个百分点,从最初的 PA 模型的 27.8:1 增加到 PG/PH 模型的 33.0:1;质量流量已经上升了约 10 个百分点,从 125.6 kg/s 到 137.4 kg/s;转速从 3600 r/min 增大到 3930 r/min。

在保持已有核心机不变的前提下发展的燃气轮机的功率范围是有限的。要继续提高燃气轮机的功率和热效率,需要对核心机进行优化、加级或去级以及放大或缩小等改进措施。其中核心机优化设计是指通过对核心机改进以提高 3 大部件的效率,而通常在实际使用中,这些措施会综合应用。在研究发展大功率、高效率的燃气轮机过程中,就进行了部件效率均按较高效率设计的计算、核心机加级、核心机前面加级、后面去级、核心机相似放大和缩小的计算分析,但研究结果不能满足要求。

2.2 开发复杂循环航改舰船燃气轮机

目前美国、英国和德国都在研制间冷(IC)和间冷回热(ICR)发动机,在经过概念研究之后,已进入产品开发阶段,已研制的 IC、ICR 燃气轮机包括:

(1)LMS100 间冷(IC)燃气轮机。该燃气轮机在充分运用现代航空发动机技术的基础上,采用了间冷循环(IC)技术,输出功率为 100 MW,热效率高达 46%^[5]。

(2)SMIC-ICR 舰船燃气轮机。该燃气轮机由英国 RR 公司研制,以效率为 37%、最大功率为 18020 kW 的舰船 SPEY SMIC 燃气轮机为基础,最大功率提高了 20%,达到 21991 kW,热效率提高到 41.43%。

(3)LM1600-ICR 燃气轮机。该燃气轮机由美国 GE 公司研制。

(4)WR-21 ICR 舰船燃气轮机(如图 2 所示)。该

燃气轮机由美国海军招标,英国 RR 和美国西屋公司联合研制,以 RR 公司的 RB211 发动机为基础。其研制目标是作为未来海军水面舰艇的下一代主推进发动机,将比现用燃气轮机燃油消耗量降低 27%,设计输出功率为 19704 kW,效率为 42%,最大输出功率可达 21624 kW,油耗率为 202.58 g/(kW·h)。

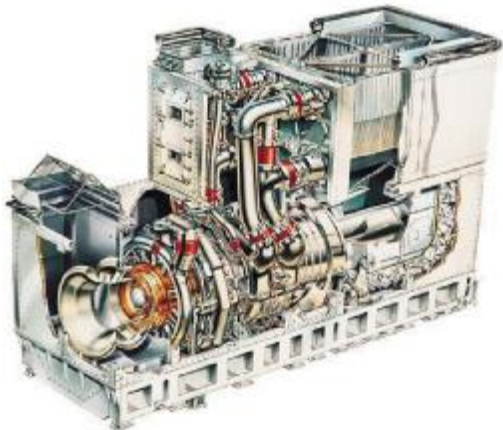


图 2 WR-21 间冷回热燃气轮机

舰船燃气轮机采用间冷回热技术是发展方向之一。采用 ICR 技术的燃气轮机不仅可改善舰船的战技性能,而且可大大减少舰船的年燃油消耗量。ICR 循环不仅在设计工况下热效率高,而且在低工况下热效率也很高,从根本上克服了普通循环燃气轮机在低工况下热效率低的缺点,为在军民舰船上采用全燃动力装置创造了条件^[6-10]。

经研究,某型航空发动机具备形成完整的舰船燃气轮机型谱的条件。因此发展大功率、高效率舰船燃气轮机可充分利用该型发动机成熟的核心机部件,经研究论证,保持该型发动机核心机不变的燃气轮机改进方案更适合选择间冷循环,效果明显^[11]。

输出功率与间冷器温降之间的关系如图 3 所示。从图中可见,如果间冷器温降达到 100 K,则燃气轮机输出功率在简单循环的基础上增加约为 20%。即

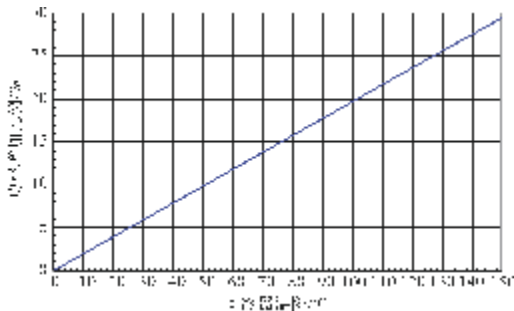


图 3 燃气轮机输出功率与间冷器温降之间的关系

若要满足间冷燃气轮机输出功率为 40000 kW 的需求,需要将某简单循环燃气轮机通过提高压比和空气流量的方法,首先使输出功率达到 30000 kW 左右。

采用上述技术途径,在继承了某型系列发动机核心机技术的基础上,采用某中档功率燃气轮机的低压涡轮,重新设计与间冷器匹配的高性能低压压气机,对某中档功率燃气轮机的动力涡轮进行改进设计,这样可以缩短研制周期、减少风险,最大限度地满足舰船对动力装置不断增长的要求。对进行航改的大功率、高效率间冷燃气轮机进行了方案论证,确定在 1.0 工况下间冷燃气轮机的性能,并与国外先进同档功率燃气轮机进行了对比,见表 3。

表 3 间冷燃气轮机与世界同档功率先进燃气轮机

技术参数比较(ISO 状态下,不考虑进排气损失)				
机 型	间冷燃气轮机	WR-21	MT-30	LM6000PC
功率/kW	40011	24897	35506	42166
热效率/%	42.4	42.1	39.8	42.1
装舰对象		45 型导弹	DDG-1000	DD21
		驱逐舰	驱逐舰	航空母舰

通过初步计算可知,该间冷燃气轮机在提高燃油经济性的同时,大大改善了在低工况下的油耗特性。

3 航改间冷燃气轮机研制的可行性

某型发动机严格按照规定试验,对其结构可靠性和寿命进行了充分考核。间冷燃气轮机继承了该型发动机的核心机结构,其他多数部件的设计也继承了该型发动机的技术和经验,这样使间冷燃气轮机的设计研制可靠性提高、风险降低。

与简单循环燃气轮机相比,间冷燃气轮机只是在低压压气机和高压压气机之间增加了 1 个由低压压气机出口扩压器、间冷器和高压进气蜗壳组成的间冷系统。间冷器设计思路为,在结构上充分借鉴 WR-21 燃气轮机的设计方法,采用 2 次间冷的方式。国内对该技术具有一定的研究基础,并已对间冷燃气轮机的间冷器进行了详细研究,通过比较不同换热器的性能和设计结果,认定板翅式换热器是 1 种传热效率高、结构紧凑、轻巧牢固、适应性强和经济性好的换热器,可以用作间冷燃气轮机的间冷设备。

总之,该间冷燃气轮机从总体到部件和系统各层次的技术方案继承性较好,所涉及的各项关键技术已经有较坚实的预研基础和可行的解决措施,大功率、高

效率间冷燃气轮机的研制方案是可行的。

4 结束语

本文分析了国内外战舰所采用的大功率、高效率燃气轮机的主要性能指标,探讨了发展航改大功率、高效率舰船燃气轮机的技术途径,表明利用某型航空发动机的资源优势,在简单循环基础上采用先进的间冷(IC)技术是1条有效途径,通过对航改大功率、高效率间冷燃气轮机方案进行研究,证实了该间冷燃气轮机不但能大幅提高功率等级和效率,而且能极大改善在低工况下的性能,克服简单循环燃气轮机在低工况下效率低的固有缺陷。

该间冷燃气轮机功率大、热效率高,除用于大型商船、军用舰船、旅游船、高速渡船和大型货船外,还可用于工业发电、管道输送等领域。

参考文献:

- [1] 郑培英.间冷燃机研究[D]. 沈阳:中航工业沈阳发动机设计研究所,2007.
ZHENG Peiying. Investigation of intercooling gas turbine[D]. Shenyang:AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute,2007.(in Chinese)
- [2] 曾凡明,吴家明,庞文洋,等. 舰船动力系统选型原理[M]. 北京:国防工业出版社,218-238.
ZENG Fanming, WU Jiaming, PANG Wenyang, et al. Principles of marine power system selection [M]. Beijing: Defense Industry Press, 218-238.(in Chinese)
- [3] 闻雪友,肖东明.现代舰船燃气轮机发展趋势分析[J]. 舰船科学技术,2010(8):3-6.
WEN Xueyou,XIAO Dongming. Analysis of modern marine gas turbine development tendency[J]. Ship Science and Technology, 2010(8):3-6.(in Chinese)
- [4] 闻雪友,肖东明. 对发展大功率船用燃气轮机的新思考[J]. 舰船科学技术,2007(4):18-22.
WEN Xueyou, XIAO Dongming. A new concept concerning the development of high power marine gas turbines [J]. Ship Science and Technology, 2007(4):18-22. (in Chinese).
- [5] 王祖浒.先进间冷式重型燃机—LMS100[J]. 国际航空,2005(1):61-62.
WANG Zuhu.Intercooled LMS-100 Gas Turbine [J]. International Aviation,2005(1):61-62.
- [6] Caniere H, Willockx A, Dick E, et al. Raising cycle efficiency by intercooling in air-cooled gas turbines [J]. Applied Thermal Engineering ,2006,26:1780-1787.
- [7] Horlock J H. Advanced gas turbine cycles[M]. Cambrige:Whittle Laboratory,2003:47-64.
- [8] 刘永葆,张仁兴. ICR 进展及关键技术 [J]. 热能动力工程, 1999,14(1):12-14.
LIU Yongbao,ZHANG Renxing. New developments in ICR engines and related key techniques[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,1999,14(1):12-14.(in Chinese)
- [9] 梁春华. ICR 舰船用燃气轮机 WR-21 的技术特点 [J]. 航空发动机, 2006,33(1):55-58.
LIANG Chunhua.The technic character of the ICR marine gas turbine WR-21 [J]. Aeroengine, 2006,33 (1):55-58.(in Chinese)
- [10] 张忠文. 舰船燃气轮机技术的发展途径 [J]. 航空发动机, 2009,35(6):49-52.
ZHANG Zhongwen. The development approach of marine gas turbine[J]. Aeroengine, 2009,35(6):49-52. (in Chinese)
- [11] 张忠文. 间冷回热燃气轮机发展现状 [J]. 航空发动机, 2010,36(3):42-43.
ZHANG Zhongwen. The development state of intercooled recuperated gas turbine[J]. Aeroengine,2010, 36(3):42-43.(in Chinese)

(上接第62页)

- study of lean premixed and prevaporized characteristics for combustor with a multi-swirler [J]. Aeroengine,2011,37(1): 20-23. (in Chinese)
- [9] 林宇震,彭云晖.分级/预混合预蒸发贫油燃烧低污染方案 NO_x 排放初步研究 [J]. 航空动力学报,2003,18(4): 492-497.
LIN Yuzhen, PENG Yunhui. A preliminary study of NO_x emission of stagingr premixed and prevaporized lean combustion

- low emission combustor scheme[J]. Journal of Aerospace Power, 2003,18(4):492-497. (in Chinese)
- [10] 胡毅,张宝诚.航空燃气涡轮发动机燃烧的 NO_x 控制及预测[J]. 航空发动机, 2002,28(3):30-36.
HU Yi, ZHANG Baocheng. Control and prediction of NO_x formation in aircraft gas turbine engine combustor [J]. Aeroengine, 2002,28(3):30-36.(in Chinese)